

大学 本科“十三五”规划教材

UNIVERSITY

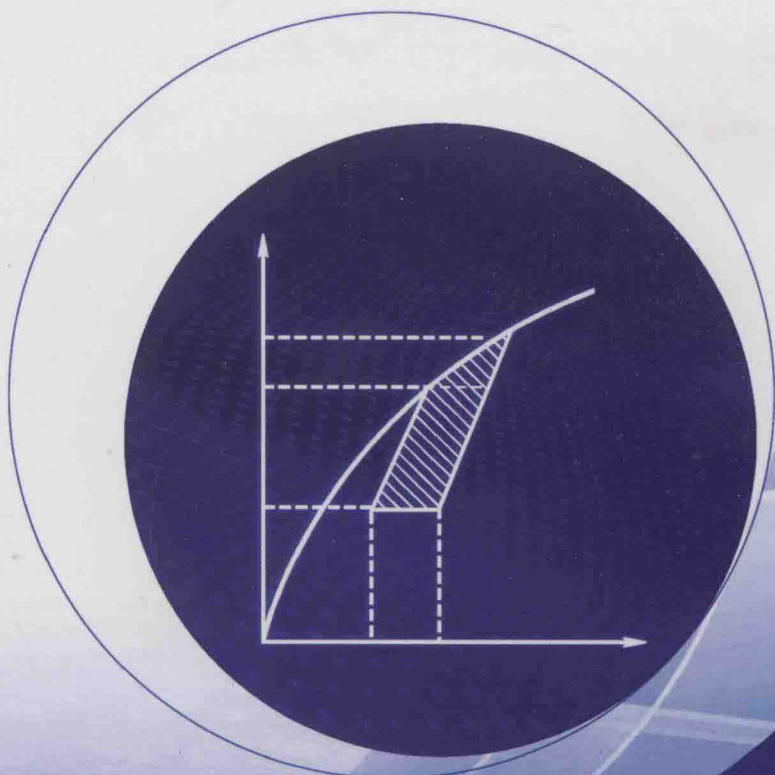


普通高等教育力学系列“十三五”规划教材

塑性力学基础

(第3版)

尚福林 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

西安交通大学 本科“十三五”规划教材
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

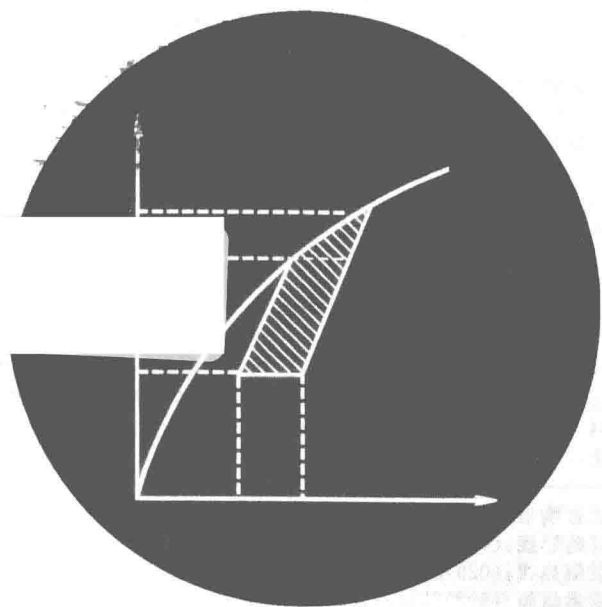


普通高等教育力学系列“十三五”规划教材

塑性力学基础

(第3版)

尚福林 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书介绍了塑性力学的基本理论和研究各种塑性力学问题的基本方法,主要内容有:应力和应变;屈服条件;塑性本构关系(增量理论和全量理论);简单的弹塑性问题(弯曲梁、扭转圆轴、受压球壳、厚壁圆筒、旋转圆盘);理想刚塑性平面应变问题;塑性极限分析和安定分析原理;典型结构(梁、刚架、薄板、薄壳)的极限分析;率相关塑性本构关系。本书兼顾理论严密性和工程应用的特点,从求解工程问题的需求出发对所涉及的基本概念和基本理论给出清晰且严谨的阐述,略去过于繁琐且不影响具体问题求解的理论推导,并尽量选择典型的工程应用中的塑性力学问题进行举例说明,其宗旨在于将经典塑性力学中重要的基础知识介绍给读者。本书可作为工程力学、结构分析、材料、机械、土建、航天、航空等工科专业的高年级大学生和研究生的塑性力学课程教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

塑性力学基础/尚福林编著. —3版. —西安:西安交通大学出版社,2018.4
普通高等教育力学系列“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5693-0535-7

I. ①塑… II. ①尚… III. ①塑性力学-高等学校-教材 IV. ①0344

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 066096 号

书 名	塑性力学基础(第 3 版)
编 著	尚福林
责任编辑	田 华
责任校对	李 文

出版发行	西安交通大学出版社 (西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址	http://www.xjtupress.com
电 话	(029)82668357 82667874(发行部) (029)82668315(总编办)
传 真	(029)82668280
印 刷	西安日报社印务中心

开 本	727mm×960mm 1/16	印张	20.25	字数	487 千字
版次印次	2018 年 8 月第 3 版	2018 年 8 月第 1 次印刷			
书 号	ISBN 978-7-5693-0535-7				
定 价	50.00 元				

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665640 QQ 190293088

读者信箱:190293088@163.com

版权所有 侵权必究

第3版前言

本书第2版出版以来,得到了许多读者和同学的认可和使用。从对读者负责的考虑出发,借出版社重印之机,对原书进行修订再版。

除了改正文字、公式和图表等印刷错误之外,主要对第2版中的“强化材料的增量型本构关系”小节进行了重写。原来的理论推导存在不当之处,给读者造成一些困惑,深感不安。另外,增加了“关于应变强化的物理解释”(见2.6节),以及Hill关于弹塑性应力解唯一性证明的说明性文字(见4.1节),删去了原书习题4.10等。

作者衷心感谢对本书提出宝贵意见的专家、同仁、读者朋友和历届同学,特别致谢华中科技大学李振环教授、武汉理工大学王向阳教授、郑州大学张旭博士、中国矿业大学力学系同仁和英国曼彻斯特大学孙永乐博士等。本次修订过程中,作者还与西安交通大学力学系马利锋教授等数位老师进行了深入讨论,收益颇多。

感谢我的研究生郭惠丽、黄哲峰、李力、武晨光、邓师哲等同学,他们亦提出了许多有价值意见。感谢西安交通大学出版社田华女士的持续鼓励、热情帮助与出色编辑工作,本书的不断完善与她的敬业精神息息相关。

尚福林

2018年3月

第2版前言

本书在2011年出版以后,除了作者所在的西安交通大学,已陆续被国内数所高校作为本科生和研究生教材使用,得到了大家的认可。一些读者反映,本书清晰易懂,塑性力学这门课程不再那么难学了。目前书已售罄,不能满足广大读者的需求。

本书第2版继续保持了原书的特点,采纳了许多力学同仁和读者提出的宝贵意见和建议,同时借鉴参考了国内外最新的若干塑性力学专著和教材(主要有参考文献[23, 33, 41~49, 55~58]),并且融入了作者近年来从事课程教学的经验以及心得体会。第2版主要变化如下。

(1)新增加1章内容,即第8章“率相关塑性本构关系”,概要介绍了考虑温度效应和应变率效应的塑性变形行为的本构模型,包括经验型本构关系、粘塑性本构关系和基于物理机制的本构关系。高温度和高加载速率条件下固体变形属于塑性力学的重要研究内容,不少读者希望书中有所涵盖,以便正确理解和合理选择塑性本构关系。

(2)第1章中新增加1.2小节“塑性变形的物理本质”,目的在于使读者对金属塑性变形有更为清晰的了解和更为深刻的认识,将唯象的连续本构理论与微观层次发生的物理过程之间建立起联系。

(3)对原书第2章部分内容进行了改写,包括:2.3小节“应变偏张量和等效应变”;2.4小节“屈服条件”;2.6小节“后继屈服条件”;2.7小节“加载、卸载准则”。其中,2.4节中补充了“各向异性屈服条件”的内容;2.6节中,重点增加了随动强化模型、组合强化模型的篇幅,对重要的强化模型给出了较为详细的说明,也增加了近年来新发展的重要结果。2.7节中补充了“一致性条件”概念的内容。

(4)改写了原书第3章3.2小节部分内容,补充了关于依留申公设的讨论性内容;3.3小节中,补充了关于“非关联流动法则”的讨论性内容;3.4小节“全量型本构关系”增加了关于全量理论适用范围的讨论和新进展;新增加了3.5小节“应变空间中的塑性本构关系”,概要介绍在应变空间中基于依留申公设所建立的塑性本构关系基本要素和数学关系式。

(5)第4章中增加“回弹分析”、“残余应力”、“反向屈服”等讨论性内容,以体现塑性力学理论与工程问题之间的紧密联系。

(6)各章末尾增加了“塑性力学人物”内容,以增强读者对塑性力学发展历史的了解和学习兴趣。

另外,调整、增加了部分习题以及详细的解答提示,以便读者练习;对原书部分“原文阅读材料”进行了改写(部分全文可以从作者个人主页网站下载:<http://gr.ertongbook.com>)。

xjtu.edu.cn/web/shangfl/13/);对原书中的许多文字叙述、数学推导、插图作了修改,并修订了印刷错误和不当之处。

作者衷心感谢对本书提出宝贵意见的专家、同仁、读者朋友和历届同学,特别致谢李振环教授、王向阳教授和孙永乐同学。

尚福林

2015 年 3 月

第 1 版前言

塑性力学和弹性力学一样,是固体力学的中心内容,是研究物体发生弹塑性变形规律的一门学科。塑性力学不仅是断裂力学、损伤力学等许多研究领域的理论基础,而且在金属材料强度和加工、结构和机械设计、结构分析以及其他一些工程实际问题等方面都有着重要的应用。作为连续介质力学的分支学科,经典塑性力学是从塑性变形材料的宏观现象出发,采用数学方法对常温附近、具有延性的多晶金属明显表现出的非弹性特性进行阐述和处理。它所研究的问题分为两方面:(1)以实验观察结果为出发点,建立塑性状态下变形的基本规律,即塑性本构关系以及有关的基本理论;(2)应用这些关系和理论,分析确定在外载荷等作用下物体或结构内各处的应力与应变的分布。

本书是为学习工程力学、结构分析的学生而编写的塑性力学教材。主要内容以作者在西安交通大学为工程力学、结构分析专业的本科生和研究生授课的讲义为基础,并汲取了国内外数部塑性力学方面较好著作的适当内容。鉴于目前课内学时数逐渐减少,本书将重点放在清晰阐述基本概念和基本理论上,并介绍了解决有关工程问题的一些基本方法。

全书分 6 章。绪论部分对金属材料的塑性行为和研究所需要的基本假设作了简单介绍。第 2 章讨论了塑性本构关系的第一、第二要素,即屈服条件的建立,着重介绍了目前常用的初始屈服条件以及强化条件。第 3 章继续讨论塑性本构关系的第三要素,即流动法则,重点介绍了增量型本构关系和全量型本构关系,该章是全书的基础理论部分。第 4 章集中讨论了采用解析方法求解简单弹塑性问题的方法和特点。第 5 章介绍求解平面应变问题的滑移线场方法。第 6、7 章分别讨论了塑性力学中最有实用意义的分支之一,即结构极限分析的基本理论和方法,主要讨论了分析确定梁、刚架、薄板、薄壳等的塑性极限载荷的方法和途径;限于篇幅,第 6 章末尾仅对塑性安定分析的基本方法作了初步介绍。对于更为有效的弹塑性有限元方法,众多计算力学教材均有相关的介绍,本书不再重复。本书各章附有一定量的习题,同时,一些章节还留有部分课后练习和讨论题,以供学生加深理解和锻炼解决实际问题的能力。

实际上,经典塑性力学所涵盖的内容相当丰富,诸如粘塑性本构理论、岩土(土壤、岩石和混凝土等)的塑性理论、复合材料塑性理论、塑性稳定性问题、塑性动力学(研究强动载荷作用下材料的动态行为、结构塑性动力响应以及弹塑性应力波的传播等问题)以及塑性大变形理论等。塑性力学仍然是一门年轻的学科,还有许多值得深入研究和探索的课题。本书对这些专门问题未作介绍,建议读者参考有关专著。

对编写本书提出建设性意见的有:俞茂宏教授、西安交通大学工程力学系多位老师、数届本科生(特别是力学硕 41、力学硕 51、力学硕 61、力学 61、力学硕 71、结构 71)、众多研究生和本科生(特别是赵朋飞、郭显聪、李晓冬、孙永乐、朱鑫垚、曾伟、黄凯等),对于他们的不断鼓励 and 热情帮助,作者表示深切的谢意! 本书得到了教育部特色专业建设项目的支持,特此致谢! 作者同时感谢西安交通大学出版社任振国老师和田华女士对本书顺利出版提供的帮助。

作者希望本书能够对力学系和有关学科的本科生和研究生以及从事塑性力学相关的教育和研究人员有所帮助。同时,恳请同行专家和使用本书的读者提出宝贵意见,并不吝赐教。联系 E-mail:shangfl@mail. xjtu. edu. cn.

作 者

2011 年 3 月于西安

目 录

前言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 塑性变形的实验观察	(1)
1.2 塑性变形的物理本质	(6)
1.3 塑性力学的研究内容	(12)
1.4 基本假设	(13)
1.5 应力-应变关系的简化	(14)
1.6 塑性力学对工程实际的意义	(17)
1.7 塑性力学的发展简史	(20)
习题 1	(22)
英文阅读材料 1	(24)
塑性力学人物 1	(25)
第 2 章 屈服条件	(27)
2.1 应力偏张量及其性质	(27)
2.2 应力空间、 π 平面和 Lode 参数	(32)
2.3 应变偏张量和等效应变	(35)
2.4 初始屈服条件和初始屈服曲面	(38)
2.5 常用的屈服条件	(42)
2.6 后继屈服条件	(57)
2.7 加载、卸载准则	(68)
习题 2	(72)
英文阅读材料 2	(73)
塑性力学人物 2	(75)
第 3 章 本构方程	(78)
3.1 几个有关的概念	(78)
3.2 Drucker 公设	(80)
3.3 增量型本构关系(塑性流动理论)	(86)
3.4 全量型本构关系(塑性形变理论)	(104)
3.5 全量理论与增量理论的比较	(116)
3.6 基于应变空间的塑性本构关系	(121)

习题 3	(124)
英文阅读材料 3	(128)
塑性力学人物 3	(132)
第 4 章 简单的弹塑性问题	(133)
4.1 弹塑性力学边值问题的提法	(133)
4.2 梁的弯曲	(136)
4.3 柱体扭转	(147)
4.4 厚壁球壳的弹塑性变形	(155)
4.5 厚壁圆筒的弹塑性变形	(158)
4.6 旋转圆盘	(167)
习题 4	(169)
英文阅读材料 4	(172)
塑性力学人物 4	(174)
第 5 章 平面应变问题	(175)
5.1 平面应变问题的基本方程	(175)
5.2 滑移线及其性质	(179)
5.3 应力和速度的间断线	(187)
5.4 简单的滑移线场	(189)
5.5 边界条件	(191)
5.6 平冲头压入半平面的极限载荷	(195)
5.7 单边受压力的楔形体	(198)
5.8 两侧带切口板条的拉伸	(200)
5.9 定常的塑性流动问题	(202)
习题 5	(206)
英文阅读材料 5	(209)
塑性力学人物 5	(212)
第 6 章 极限分析方法	(213)
6.1 概述	(213)
6.2 一个熟悉的例子:塑性铰与极限载荷	(215)
6.3 虚功率原理	(217)
6.4 极限分析的基础理论和分析方法	(219)
6.5 梁和刚架的极限分析	(230)
6.6 安定分析理论的初步介绍	(234)
习题 6	(235)
英文阅读材料 6	(237)
塑性力学人物 6	(239)
第 7 章 板壳的极限分析	(241)
7.1 薄板弯曲问题的基本假设和基本方程	(241)

7.2 圆板轴对称弯曲的极限分析 (243)

7.3 矩形板的极限载荷 (248)

7.4 薄壳的基本假设和基本方程 (252)

7.5 圆柱壳体在轴对称载荷作用时的塑性极限条件 (256)

7.6 夹层壳的塑性极限条件 (262)

习题 7 (270)

英文阅读材料 7 (272)

塑性力学人物 7 (274)

第 8 章 率相关塑性本构关系..... (276)

8.1 高温和高应变率下材料的变形特点 (277)

8.2 经验型本构关系 (284)

8.3 经典粘塑性本构关系 (287)

8.4 物理型本构关系 (298)

习题 8 (304)

英文阅读材料 8 (305)

塑性力学人物 8 (308)

参考文献..... (310)

第 1 章 绪 论

塑性力学是变形固体力学的一个分支。塑性力学是以弹性力学为基础的,在学习塑性力学之前有必要对弹性力学的内容作一回顾。图 1.1 为弹性力学课程的基本内容框图。

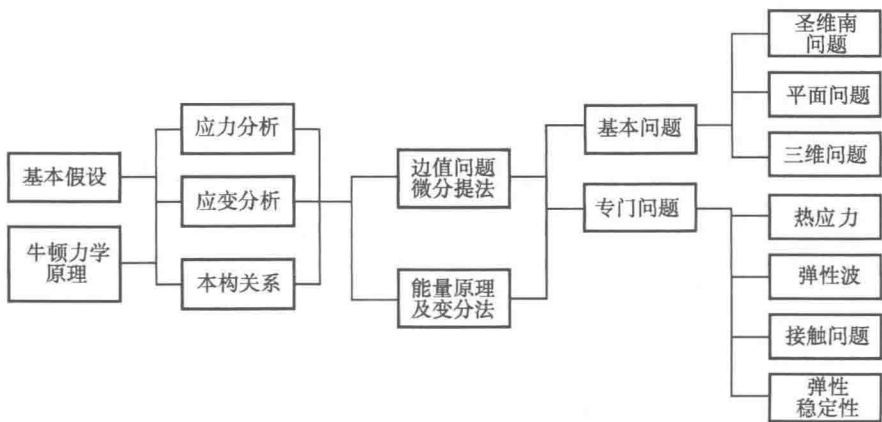


图 1.1 弹性力学课程的基本内容

弹性力学对所研究的对象最基本的特征做出了描述,假设物体是连续的、均匀的、各向同性的,服从线弹性(linear elasticity)规律、变形(位移和应变)是微小的,且物体内部无初应力。从学科结构的严密性和系统性来看,弹性力学是固体力学所有学科中的典范,它是学习固体力学其他分支学科的基础。从学科发展来看,弹性力学在其专门问题的深入研究及在相关的新兴学科方面都有了进一步的发展,例如,非均匀弹性理论、各向异性弹性理论、非线性弹性理论、电磁弹性理论、微结构弹性理论等等。

塑性力学和弹性力学一样,是固体力学的中心内容。它既是基础的理论学科,又是重要的应用学科,是结构和机械设计、金属材料加工及强度研究等必不可少的基础内容。学习塑性力学的过程中,应注意与弹性力学的有关内容相联系,认清哪些知识是与弹性力学相一致的,哪些是有本质区别的,这对理解塑性力学的特点是很有好处的。

学习塑性力学除需要有一定的数学、物理及力学的基础外,还需要有金属物理的知识,这样才能把宏观和微观的研究结合起来。塑性力学是金属压力加工、结构极限设计、板壳理论、复合材料力学、蠕变力学、断裂力学、冲击动力学、爆炸力学以及弹塑性有限元分析等课程必不可少的基础。

1.1 塑性变形的实验观察

实践是建立理论的基础。在建立塑性理论和进行结构弹塑性分析之前,应该首先研究材料在塑性变形阶段的力学性质和变形规律。

1. 单轴拉伸(压缩)实验

图 1.2 为金属材料单向拉伸实验得到的典型载荷-伸长量曲线。在拉伸的初始阶段,载荷和伸长量成正比。当其偏离线性规律时,认为**初始屈服**(initial yield)发生, Oa 阶段为**弹性阶段**(elastic region)。如果在实验试样变形超过 a 点到达 b 点时,将载荷完全卸除,则会剩余有不能恢复的永久变形量 Oc ,这部分变形称为**塑性变形**(plastic deformation)。 cb 段的斜率非常接近于 Oa 段的斜率,即与杨氏模量 E 成比例。最大载荷位于 d 点,在该点或者接近于该点时刻开始发生局部**颈缩**(necking),试样不再均匀地变形。

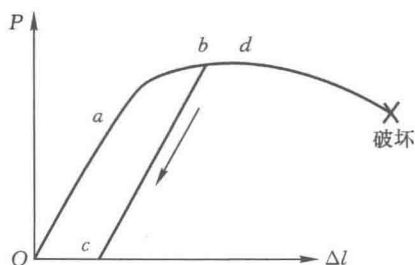


图 1.2 金属材料拉伸实验的典型载荷-伸长量曲线

在 d 点之后的某个时刻,试样最终发生断裂。颈缩是材料的一种**几何失稳**(instability)行为,此时材料的应变强化不足以弥补横截面的局部削减。如果将颈缩之后的拉伸数据进行分析,就会发现,真实应力($\sigma = P/A$)会单调增长直至失效开始。典型金属的初始屈服应变大约处于 $0.1\% \sim 1\%$ 范围,而颈缩时的应变则会比它大 $10 \sim 40$ 倍。变形之后,试样大体上无永久的体积变化。而且,当试样受到静水压力载荷时,得到的载荷-伸长量曲线没有多大变化。也就是说,静水压力基本上不引起永久变形。

图 1.3 为一般金属材料 and 低碳钢进行简单拉伸、压缩实验得到的名义应力-名义应变曲线。这里的名义应力 σ 、名义应变 ϵ 均是按试件的原始尺寸计算的,即

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= P/A_0 \\ \epsilon &= (l - l_0)/l_0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.1)$$

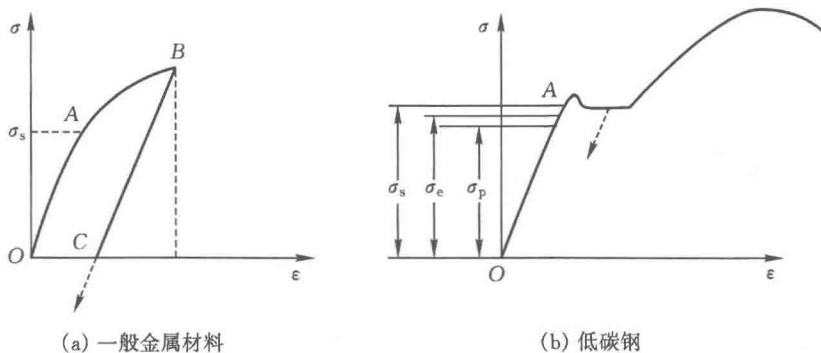


图 1.3 金属材料拉伸实验的名义应力-应变曲线

它反映了常温、静载下材料在受力过程中应力-应变关系的全貌,显示了材料固有的力学性能。对于低碳钢、铸钢、部分合金钢等,通常有比较明显的屈服阶段,存在**比例极限**(proportional limit) σ_p 、**弹性极限**(elastic limit) σ_e 以及**屈服应力**(yield stress) σ_s 三个参数的差别。由于它们非常接近,在工程上对它们一般不严加区分。退火软钢和一些铝合金还有上、下屈服点,由于上屈服点一般不稳定,对实验条件敏感,常采用下屈服点所对应的应力作为 σ_s 。在应力超过 σ_s 之后,会出现一个应力基本不变而应变显著增加的屈服(流动)阶段。对于中碳钢、部分高强度

金钢和部分有色金属等,常观察不到明显的屈服阶段。工程上往往以残余应变达0.2%时作为塑性变形的开始,其对应的应力作为材料的屈服应力,以 $\sigma_{0.2}$ 表示。在塑性力学中规定,屈服极限 σ_s 作为弹性和塑性的分界点。

在变形过程中,试件的尺寸在不断地变化,因此,上述 σ - ϵ 曲线不能真实地反映瞬时应力-应变关系。若考虑试件尺寸变化,可定义如下真应力(或称自然应力)和自然应变(或称对数应变)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_T &= P/A \\ \epsilon_T &= \ln(l_1/l_0) \end{aligned} \right\} \quad (1.1.2)$$

式中: A 为各瞬时的截面积; l_0 为原始长度; l_1 为瞬时长度。以 σ_T 和 ϵ_T 为坐标轴的曲线反映了各瞬时的应力-应变关系,称为真应力-自然应变曲线。图1.4为几种材料的真应力-自然应变曲线(据Ludwik & Scheu的实验结果)。为便于将拉伸和压缩试验结果放在一起,画出的是应力、应变的绝对值,而且,拉伸应力是相对于截面积的减小值计算而得,压缩应力是相对于试件高度的减小值计算而得的。实验结果显示,拉伸和压缩两种情形下得到的真应力-自然应变关系差异不大。因此,在处理工程问题时,一般都把二者看成是一致的。

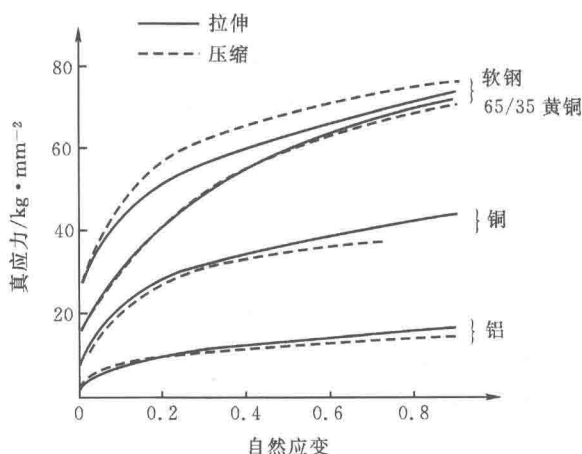


图1.4 拉伸和压缩应力-应变关系的比较

以下对塑性变形的具体表现作一仔细观察。

(1) 加载和卸载

在弹性变形的范围内,如图1.5(a)所示,其应力应变曲线往返的路径是一致的。当应力超过某一限度(如 σ_s)后去掉外力时,则不能恢复原形,有一部分变形被保留下来,如图1.5(b)所示。在力去掉以后立即消失的变形(CE)是弹性变形 ϵ^e ,除此之外被保留下来的部分(OC)称为非弹性变形(inelastic deformation)。在非弹性变形当中,有一部分(DC)会随时间的增长而缓慢消失,这种现象称为弹性后效(又称应力后效、滞弹性(anelasticity),指应力卸除后,当经历充分长时间,部分应变可以逐渐恢复,即应变相对于应力有滞后现象),它是由材料的粘性(viscosity)引起的。最后不能消失的部分(OD)为永久变形。在一定的应力作用下,永久变形随时间而缓慢增加的现象称为蠕变(creep),它也是由材料的粘性引起的。这种与时间有关的永久变形称为流态变形;而与时间无关、只和应力有关的永久变形就是塑性变形 ϵ^p 。

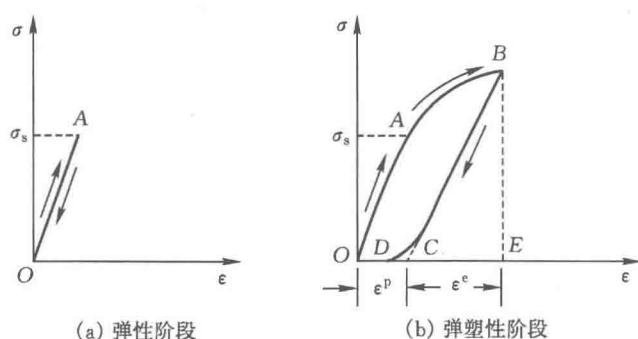


图 1.5 不同变形阶段的加载与卸载规律

一般来说,在常温下,硬金属的弹性后效和蠕变变形与塑性变形相比是非常小的,因此,就把非弹性变形作为塑性变形来理解,即图中 $OD \approx OC$, 且 $\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p$ 。但对常温下的软金属和高温下的金属,与时间有关的变形是不能忽略的。

(2) 卸载后再加载

对多数材料来说,屈服之后要使变形继续增大,就需要继续增加载荷。材料的这种反应称为**应变强化**(strain hardening)或**加工强化**(work hardening)。如图 1.6 所示,若在卸载后重新加载,应力-应变曲线首先遵从直线关系直到最初卸载的应力点,然后画出一条略微弯曲的区段,再下去则遵从一条与原来单调加载情况下基本相同的曲线,就像未曾卸载一样。继续发生新的塑性变形时材料的再度屈服称为**后继屈服**,相应的屈服点称为**后继屈服点**。由于强化作用,材料的屈服应力提高了。这一变形阶段称为**强化(或硬化)阶段**。可以看出,由于加载和卸载规律的不同,引起塑性阶段应力与应变的多值对应关系(如图中虚线 AB 所示)。

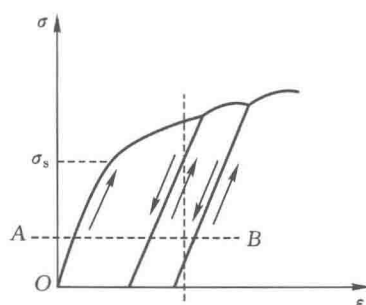


图 1.6 材料的强化特性

(3) 反向加载

材料在拉伸强化后卸载,再进行反向加载(压缩)至屈服。实验发现,新的屈服应力一般低于最初未强化就反向加载时的屈服点的应力值。这种现象最早由德国的 J. Bauschinger(鲍辛格)发现,因此被称为**Bauschinger 效应**。如图 1.7 所示, $\sigma''_s < \sigma'_s$ 。这一效应说明,强化材料随着塑性变形的增加,屈服极限在一个方向上提高而在相反方向降低。这样,即使是初始各向同性的材料,在出现塑性变形之后,也会变为各向异性,即鲍辛格效应使得材料具有各向异性性质。

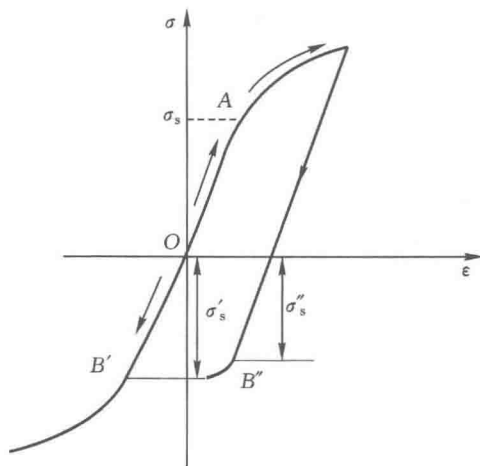


图 1.7 Bauschinger 效应

(4) 应力循环

如图 1.8 所示,设材料从某一应力状态 σ_0 (图

中 d 点)开始加载,应力-应变关系按线性规律由 d 点达到 e 点,这时如给一应力增量 $d\sigma$,它将引起一个新的塑性应变增量 $d\epsilon^p$ 。在此变形过程中应变能有了增量。若从 f 点卸载,应力又降为 σ_0 (图中 g 点)。这时弹性应变恢复,弹性应变能得到释放,而塑性应变被残留下来,相应的塑性应变能(图中的阴影部分)被保留而不能释放。也即,产生这一新的塑性变形 $d\epsilon^p$ 会耗散掉一定的能量。与此相应的外力功称为塑性功,它是不可逆的。所以,在上述应力循环中塑性功恒大于零(或非负),即

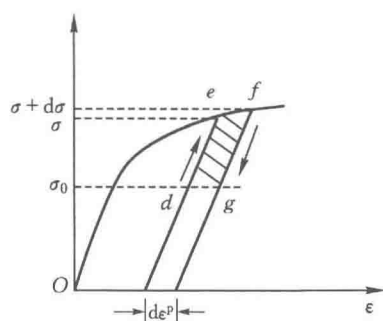


图 1.8 塑性功不可逆

$$\left. \begin{aligned} (\sigma - \sigma_0) \cdot d\epsilon^p &\geq 0 \\ d\sigma \cdot d\epsilon^p &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.3)$$

式中的等号适用于理想塑性材料。

2. 静水压力实验

P. W. Bridgman(布里奇曼)曾进行了不同金属材料在静水压力(各向均压)作用下的拉伸试验,即著名的 Bridgman 试验。Bridgman 通过大量的高压(各向均压)试验发现以下结论。

① 静水压力与材料体积的改变近似地服从线弹性规律,若除去压力,体积变化可以恢复,没有残余的体积变形,这样就可以认为各向均压时体积变化是弹性的。也就是说,静水应力状态不影响塑性变形而只产生弹性的体积变化。试验还表明,这种体积变化是很小的。例如,弹簧钢在 10000 个大气压下体积缩小约 2.2%。因此,对于一般应力状态下密实的金属材料,当发生较大的塑性变形时,可以忽略弹性的体积变化,而认为材料在塑性状态时的体积是不可压缩的。后面将会看到,这一假设在建立塑性本构关系时极其重要。

② 静水压力与材料的屈服极限 σ_s 无关。Bridgman 用不同钢材(如镍、钨)试样作出轴向拉伸时的应力-应变曲线与轴向拉伸和静水压力共同作用时的拉伸应力-应变曲线,如图 1.9 所示。比较发现,在静水压力增加的条件下,塑性强化效应不大;静水压力对初始屈服的影响很小,可以忽略不计。对多数金属而言,这个结论已经被确认在静水压力不大的条件下(材料屈服极限量级)是比较符合的。但对于软金属、矿物及岩土等材料,静水压力的影响比较明显,不能忽略,需要放弃这一假设。

概括上述单轴拉伸、压缩和静水压力实验结果,可以将塑性变形的特点总结如下:

① 不可恢复性是塑性变形的表现;从材料本身的力学行为或响应来看,材料进入塑性变形阶段,加载和卸载规律不同则是塑性变形的本质特点;

② 进入塑性变形阶段,应变不仅与应力水平有关,还和加、卸载路径(历史)有关,即路径相关性(path dependency);

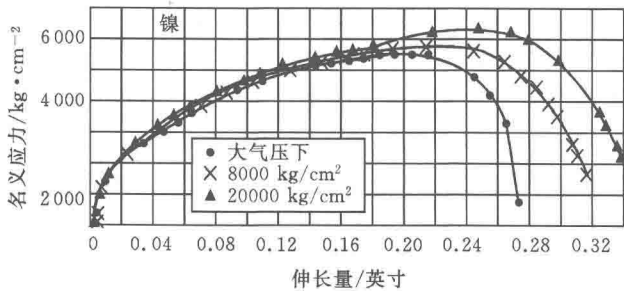
③ 有强化现象;

④ 存在 Bauschinger 效应;

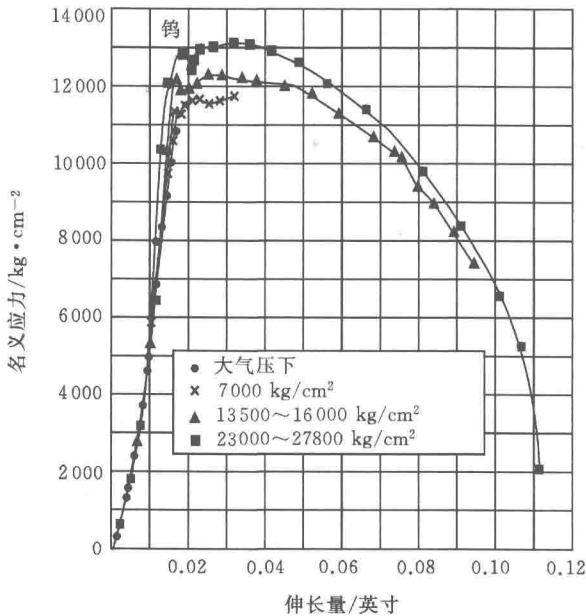
⑤ 塑性功不可逆,塑性变形会耗散一定的能量,即耗散性(dissipation);

⑥ 静水应力状态不影响塑性变形,材料在塑性状态时体积不可压缩。

塑性变形的特点集中地表现在应力与应变的关系上。简言之,金属材料的塑性(plasticity)就是变形的不可恢复性(irreversibility)。



(a)不同静水压力作用下镍的拉伸曲线



(b)不同静水压力作用下铜的拉伸曲线

图 1.9 不同静水压力作用下的拉伸曲线

1.2 塑性变形的物理本质

本节简要介绍发生屈服和塑性变形的原因,包括材料的微观结构和塑性变形过程中微观层次主要的物理过程。这些内容并非本课程的学习重点,但是十分有助于理解材料塑性变形的各种实验结果,同时也可作为后面建立塑性本构关系提供依据和基础。

1. 晶体结构与晶体滑移

一般来说,塑性力学是以多晶体韧性材料的变形行为作为研究对象而发展起来的。构成多晶体的一个一个晶粒内部有大量的原子群,它们在三维空间有序排列形成规则的晶格(lattice)。典型金属材料的代表性晶体结构有面心立方(fcc)、体心立方(bcc)、密排六方(hcp)三种,如图 1.10 所示。

该图示意说明了一个单位晶格(称晶胞)的构造情况,晶胞在三维空间重复堆砌就构成空间点阵,即晶体结构。对于多晶体(polycrystal)而言,其各个晶粒取向是随机的,当无初始应